

УДК 674.093

В.Ф. Дунаев, В.И. Мелехов

Архангельский государственный технический университет

Дунаев Владимир Федорович родился в 1938 г., окончил в 1970 г. Северо-Западный заочный политехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Архангельского государственного технического университета. Имеет более 50 печатных трудов в области автоматизации процессов лесопиления.

Тел.: (8182) 29-12-85



Мелехов Владимир Иванович родился в 1939 г., окончил в 1961 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой древесиноведения и тепловой обработки древесины Архангельского государственного технического университета, академик РАЕН и АПК. Имеет более 250 работ в области технологии высококачественной сушки, пропитки древесины и использования на основе новых технологий малоценной древесины и отходов деревообработки.

Тел.: (8182) 21-61-49



ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ ВО ВРЕМЕНИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Установлена неизвестная ранее закономерность изменения механических свойств древесины во времени при деформировании; приведены уравнение состояния материала и программа для вычисления его коэффициентов; показана возможность анализа диаграмм, имеющих несколько фаз, обусловленных анизотропией.

Ключевые слова: деформация, реакция, диаграмма деформирования, уравнение состояния, компонент.

Древесина как конструкционный материал наиболее широкое распространение получила в строительстве. Для надежной эксплуатации деревянных конструкций необходимо знать не только механические свойства каждого ее элемента и рассчитывать долговечность, но и иметь уравнение состояния материала и реальные параметры элементов, входящих в конструкцию.

В развитие теоретических представлений о механических и физико-химических свойствах древесины большой вклад внесли И.П. Кулибин, Д.И. Журавский, В.Г. Шухов, Г.Г. Карлсен, Ф.П. Белянкин, Л.М. Иванов, В.Л. Иванов, В.Ф. Иванов, Ю.М. Иванов, В.М. Коченов, П.Л. Дмитриев, В.М. Хрулев, Ю.В. Слицкоухов, Б.А. Освенский, Е.Н. Квасников, Ю.С. Соболев и др.

Представления о древесине как упруговязкопластическом материале натолкнулись на сложность математического описания процессов деформирования и нагружения, которое, опираясь на неразрушающие испытания при деформировании или нагружении, могло бы предсказывать как ее поведение во времени, так и некоторые характеристики (упругость, деформируемость, релаксация реакции деформированного тела, ползучесть и долговечность).

Главная проблема при проведении испытаний образцов древесины заключается в том, что получаемые диаграммы исследуемого процесса могут быть проанализированы описательно. На рис. 1 для наиболее распространенных металлов и древесины приведены диаграммы деформирования ,

на которых отмечены характерные точки и участки развития реакции материала на нагружение.

Древесина, обладающая четко выраженной анизотропией строения, отличается многообразием диаграмм деформирования. Например, при ее сжатии поперек волокон диаграмма может быть одно- и трехфазной, при поперечном изгибе – *s*-образной. Нелинейность начального участка не позволяет использовать закон Гука для расчетов деревянных конструкций.

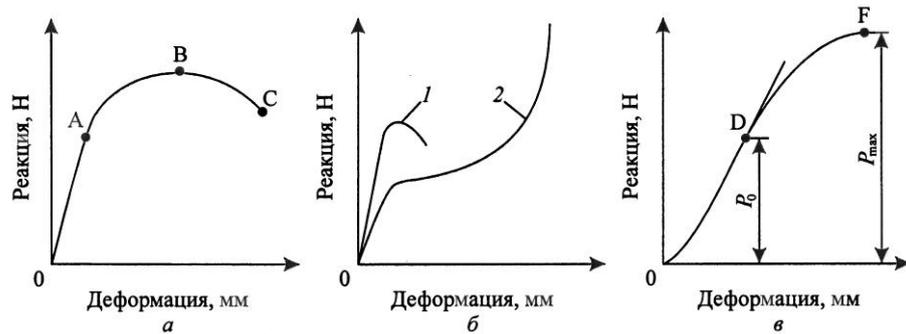


Рис. 1. Диаграммы деформирования металла [2] (а) и древесины (б, в): б – одно- (1) и трехфазная (2) при сжатии [1], в – *s*-образная при поперечном изгибе [4]; ОА – стадии упругих деформаций, А – начало пластических деформаций в отдельных зернах металла, АВ – стадия упруго-пластических деформаций, начало массовых пластических деформаций, В – начало разрушения, ВС – стадия разрушения, С – конец разрушения, P_0 – реакция в точке D перегиба, P_{\max} – максимальная реакция в точке F хрупкого разрушения

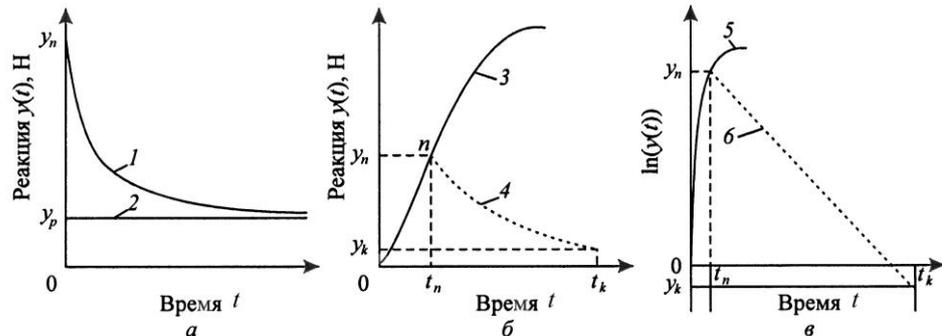


Рис. 2. Реакция древесины на деформирование: а – типовая диаграмма [3] (1) с пределом снижения реакции (2); б – диаграмма для поперечного изгиба с постоянной скоростью деформирования (3) и релаксацией (4) от начальной реакции древесины y_n , деформированной за время t_n , до реакции y_k в момент окончания деформирования t_k ; в – аппроксимация релаксации $y(t)$ (5) в логарифмическом масштабе уравнением прямой $\ln(y(t)) = \ln y_n - ct$ (6)

Наиболее информативными и доступными для анализа являются диаграммы деформирования и релаксации. Рассмотрим диаграмму, полу-

ченную при поперечном изгибе древесины с постоянной скоростью деформирования (рис. 2).

По данным Ю.М. Иванова [3], реакция деформированного тела (кривая 1) со временем уменьшается, асимптотически приближаясь к некоторому пределу y_p (прямая 2), меньше которого она не может быть (рис. 2, а). Полагая причиной такого утверждения ограниченность времени наблюдения за процессом релаксации, авторами было решено провести исследования на современной испытательной технике с записью результатов в цифровой форме, что позволило построить диаграммы не только в линейном, но и в логарифмическом масштабе как по одной, так и по двум осям.

Релаксация реакции

Для выяснения характера релаксации y деформируем образец за время t_n деформирования до деформации x , при которой образец отреагирует с силой y_n (рис. 2, б, кривая 3), после чего деформирование прекращаем и продолжаем регистрировать реакцию y с течением времени (рис. 2, б, кривая 4).

Для выявления закономерности изменения реакции во времени строим график в координатах $t, \ln(y)$ (рис. 2, в). Линия б в этом случае представляет собой прямую, что свидетельствует об отсутствии предела снижения реакции до некоторой величины y_p :

$$\ln y = \ln y_n - ct,$$

где y – реакция в зависимости от времени релаксации;

c – коэффициент, характеризующий скорость релаксации;

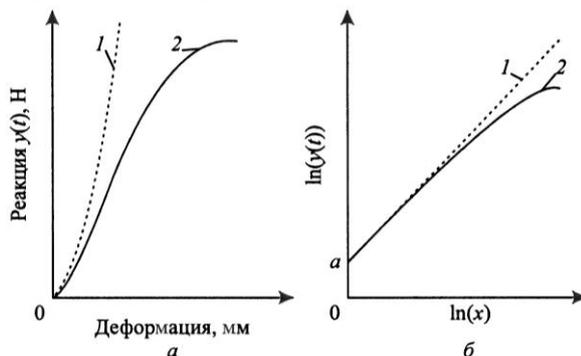
t – продолжительность релаксации.

После потенцирования имеем:

$$y(t) = y_n e^{-ct}.$$

Здесь e – основание натуральных логарифмов.

Рис. 3. Диаграммы реакции древесины на деформацию в натуральном выражении (а) и в логарифмическом масштабе (б): 1 – силовые возможности $y_b(x)$ древесины к началу опыта; 2 – реакция $y(x)$ на деформацию x



Поскольку все результаты измерения реакции отражают разрушения этих сил по закону e^{-ct} , которые происходили в древесине при деформировании, восстанавливаем состояние силовых возможностей образца до опыта:

$$y_b(x) = y(x)e^{ct},$$

где $y(x)$ – измеренная реакция на деформацию образца x ;

t – продолжительность деформирования, $t = x/v$;

v – скорость деформирования.

Представляем восстановленные силы на графике (рис. 3, а).

Применяем логарифмирование значений $ub(x)$ и деформации x , которое выравнивает график силовых возможностей образца, и аппроксимируем его прямой (рис. 3, б):

$$\ln ub(x) = a + b \ln(x). \quad (1)$$

Уравнение состояния образца

После потенцирования уравнения (1), умножения обеих его частей на e^{-ct} и введения подстановки $E = e^a$ получаем уравнение состояния образца:

$$y(x, t) = E x^b e^{-ct}, \quad (2)$$

где $y(x, t)$ – реакция образца на его деформацию x в момент времени t от начала деформирования;

E – коэффициент упругости, $E = e^a$;

b – структурный коэффициент образца, учитывающий сопротивляемость образца изменению формы.

Рис. 4. Экспериментальная (1) и теоретическая (2) диаграммы деформирования (а) и зависимость развития реакции от скорости v деформирования древесины (б): 3 – $v = 3$ мм/с; 4 – 2; 5 – 1 мм/с

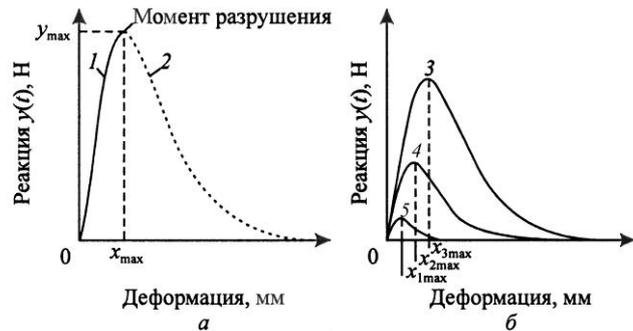


Рис. 5. Диаграммы деформирования образца древесины при повторных испытаниях на поперечный изгиб: 1 – однократное деформирование до разрушения; 2 – частичное деформирование; 3 – разгрузка после частичного деформирования; 4 – повторное деформирование до разрушения



Уравнение (2) точно описывает поведение образца при непрерывном деформировании, вплоть до момента хрупкого разрушения, которому соответствуют максимальные деформация x_{\max} и реакция y_{\max} . При этом уравнение (2) описывает реакцию при деформациях, больших x_{\max} , которые наблюдаются только при ползучести нагруженного образца.

Ненаблюдаемая часть диаграммы показана на рис. 4, а пунктирной линией.

В случае деформирования с постоянной скоростью v деформация $x = tv$ и реакции образца

$$y(t) = E (vt)^b e^{-ct}. \quad (3)$$

Если при этом измеряют деформацию и время $t = x/v$, то

$$y(x) = E (vt)^b e^{-cx/v}. \quad (4)$$

Время t_{\max} , соответствующее моменту разрушения, находят, приравняв нулю первую производную функции (3):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} E (vt)^b e^{-ct} &= E (vt)^b \frac{b}{t} \exp(-ct) - E (vt)^b c \cdot \exp(-ct); \\ E (vt)^b \exp(-ct) \frac{b - ct}{t} &= 0; \\ t_{\max} &= \frac{b}{c}; x_{\max} = \frac{vb}{c}. \end{aligned}$$

Влияние скорости деформирования на развитие реакции показано на рис. 4, б.

Повторное деформирование, которое можно проводить на испытательных установках, показывает как изменяются механические свойства древесины уже к следующему циклу (рис. 5).

Расчет коэффициентов уравнения состояния однокомпонентного образца по результатам испытаний

Для экспериментов используют установки с автоматической регистрацией результатов. Отсчеты проводят по командам от датчика деформации, цену импульсов которого выбирают так, чтобы получить не менее 100 отсчетов на образец. Результаты испытаний заносят в таблицу:

Номер отсчета	Деформация, мм	Реакция (нагрузка), Н	Время отсчета, с
i	x_i	y_i	t_i

Программа вычисления коэффициентов уравнения состояния однокомпонентного образца

1. Используя данные таблицы, строят график и определяют число измерений D неповрежденного участка диаграммы. На рис. 6 $D = 435$ при общем числе измерений 560; скорость деформирования $v = 0,747 \cdot 10^{-4}$ мм/с.

2. Выполняют логарифмирование уравнения (2):

$$\ln y = \ln E + b \ln x - c \frac{x}{v},$$

которое позволит разделить сомножители, содержащие три неизвестных коэффициента E , b и c , и сформировать систему трех уравнений:

$$AD_f + bB_1 + cC_1 = Y_1;$$

$$AD_f + bB_2 + cC_2 = Y_2;$$

$$AD_f + bB_3 + cC_3 = Y_3.$$

Здесь $A = \ln E$; D_f – целая часть дроби $D/3$, $D_f = 145$ – число отсчетов, приходящихся на одно уравнение системы; $B = \ln(x)$; $C = x/v = t$; $Y = \ln(y)$.

Систему решают матричным методом:

$$M = \begin{pmatrix} D_f B_1 - C_1 \\ D_f B_2 - C_2 \\ D_f B_3 - C_3 \end{pmatrix}; \quad V = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}; \quad R = M^{-1}V.$$

3. Формируют коэффициенты B и C матрицы и вектор-столбец Y системы и вычисляют коэффициенты матрицы M .

Для первого уравнения системы выбирают результаты каждого третьего измерения, начиная с первого. Наибольший номер измерения (номер отсчета) $i \leq D - 2$:

$$i = 1, 4, \dots, \overbrace{D - 2}^{\sim}$$

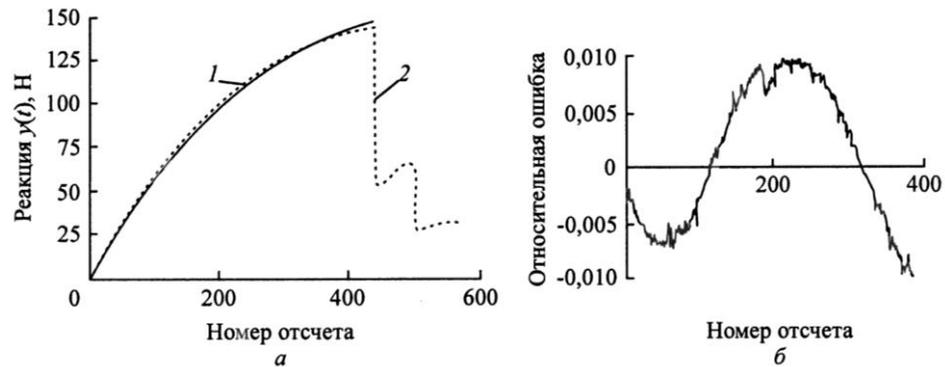


Рис. 6. Диаграммы деформирования образца древесины (а) и относительная ошибка вычислений (б): 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная, использованная в программе вычисления коэффициентов по уравнению (2)

Суммируют результаты с выбранными номерами

$$Y_1 = \sum_i \ln \overbrace{\left(\frac{x_i}{v} \right)}^{\sim}; \quad B_1 = \sum_i \ln \overbrace{\left(\frac{x_i}{v} \right)}^{\sim}; \quad C_1 = \sum_i \frac{x_i}{v}$$

и получают

$$Y_1 = 581,671; \quad B_2 = 56,664; \quad C_1 = 3,723159 \cdot 10^6.$$

Для второго уравнения системы выбирают результаты каждого третьего измерения, начиная со второго. Наибольший номер измерения (номер отсчета) $i \leq D - 1$:

$$i = 2, 5, \dots, \overbrace{D - 1}^{\sim}$$

Суммируют результаты с выбранными номерами

$$Y_2 = \sum_i \ln \overbrace{\left(\frac{x_i}{v} \right)}^{\sim}; \quad B_2 = \sum_i \ln \overbrace{\left(\frac{x_i}{v} \right)}^{\sim}; \quad C_2 = \sum_i \frac{x_i}{v}$$

и получают

$$Y_2 = 627,098; B_2 = 69,787; C_2 = 4,191 \cdot 10^6.$$

Для третьего уравнения системы выбирают результаты каждого третьего измерения, начиная с третьего. Наибольший номер измерения (номер отсчета) $i \leq D$:

$$i = 3, 6 \dots D.$$

Суммируют результаты с выбранными номерами

$$Y_3 = \sum_i \ln \left(\frac{x_i}{v} \right); B_3 = \sum_i \ln \left(\frac{x_i}{v} \right); C_3 = \sum_i \frac{x_i}{v}$$

и получают

$$Y_3 = 629,022; B_3 = 71,898; C_3 = 4,211 \cdot 10^6.$$

4. Решают

$$R = \begin{pmatrix} 4,2 \\ 1,028 \\ -1,28 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}.$$

Окончательно получают $E = e^{4,2} = 66,686 \text{ Н/мм}$; $b = 1,028$; $c = -1,28 \cdot 10^{-5} \text{ мс}^{-1}$.

Материалы с несколькими компонентами

Древесину при сжатии вдоль и поперек волокон следует рассматривать как многокомпонентный материал. Под компонентами понимаем составные неоднородные части материала, например раннюю и позднюю древесина, участки с разным капиллярным строением, годовые кольца.

Диаграммы для каждого компонента выделяем следующим образом. На одном поле размещаем экспериментальную диаграмму (рис. 7, а и б, кривые 1), по уравнению (2) подбираем параметры диаграммы для первого компонента (кривая 2). Признаком правильного выбора является наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных на участке диаграммы 1, вправо от точки перегиба до точки разрушения. Находим разность между



ординатами кривых 1 и 2, используя ее в качестве основы для подбора параметров диаграммы второго компонента, добиваясь наилучшего приближения к основе.

Рис. 7, а и б отличаются тем, что экспериментальная диаграмма 1 на рис. 7, б не имеет точки перегиба (чаще всего эксперименты прекращают

раньше, чем будет достигнута эта точка, или прочность образца превысит силовые возможности установки и сработает система ее защиты). В этом случае признаком наилучшего выбора диаграммы первого компонента является наилучшее приближение к конечному восходящему участку.

Наличие двух и более компонентов, воспринимающих растущую деформацию, исключает хрупкое разрушение, которое наблюдается у однокомпонентного материала.

Многокомпонентный материал описывается следующим обобщенным уравнением:

$$\sum_{i=1}^n E_i x^{b_i} e^{-c_i t} = y, \quad (5)$$

где n – число компонентов, составляющих твердое тело и отличающихся значениями нижеперечисленных физических характеристик:

E_i – коэффициент упругости компонента;

x – деформация, одинаковая для всех компонентов;

b_i – структурный коэффициент компонента, учитывающий неодинаковую сопротивляемость изменению формы тела;

e – основание натуральных логарифмов;

c_i – коэффициент разрушения компонента, характеризующий скорость его разрушения;

t – продолжительность деформирования;

y – нагрузка (или реакция при деформировании тела).

Выводы

1. Уравнения (2) и (5) могут быть использованы в теории упругости, которая служит основой расчетов на прочность, деформируемость и устойчивость в строительном деле, авиа- и ракетостроении, машиностроении и др. областях техники и промышленности.

2. Уравнения (2) и (5) позволяют отказаться от применения в теории упругости обобщенного закона Гука, согласно которому напряжения линейно зависят от деформаций и который применим при малых деформациях и приводит к существенным погрешностям в расчетах при больших деформациях и длительных приложениях нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровиков, А.М. Справочник по древесине [Текст]: справ./ А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев; под ред. Б.Н. Уголева. – М.: Лесн. пром-сть, 1989. – 296 с.
2. Жуковец, И.И. Механические испытания металлов [Текст] / И.И. Жуковец. – М.: Высш. шк., 1986. – 199 с.
3. Иванов, Ю.М. Предел пластического течения древесины [Текст] / Ю.М. Иванов. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1948. – 200 с.
4. Соболев, Ю.С. Древесина как конструкционный материал [Текст] / Ю.С. Соболев. – М.: Лесн. пром-сть, 1979. – 248 с.

Поступила 07.12.09

V.F. Dunaev, V.I. Melekhov
Arkhangelsk State Technical University

Pattern Changes of Wood Mechanical Properties in Time under Deformation

A previously unknown pattern of change in time of wood mechanical properties under deformation is established. The equation of the material state and program for calculating the coefficients are provided, the ability of analyzing curves with several phases caused by anisotropy is shown.

Keywords: deformation, reaction, deformation curve, state equation, component.
